

УДК 621.314

ГАРМОНИКИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ**Веретнов А.Г., Дубовик Д.В., Таранов С.И.****Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Язев В.Н.*****Сибирский федеральный университет***

Электроснабжение потребителей в России и во всем мире осуществляется на синусоидальном переменном трехфазном токе стандартной частоты 50-60 Гц. Часть потребителей нуждаются при этом в другой частоте, большей или меньшей стандартной. К таким потребителям относятся промышленные частотно-регулируемые электроприводы, электросварка, тяговые железнодорожные подстанции, линейные двигатели и т.п.

При работе указанного оборудования возникают, кроме основной, множество высших гармоник, которые через сеть проникают к другим потребителям, вынуждая использовать дорогие фильтры.

Гармоники это синусоидальные волны, суммирующиеся с основной частотой 50 Гц (т.е. 1-я гармоника = 50 Гц, 5-я гармоника = 250 Гц).

ГОСТ на качество электроэнергии регламентирует высшие гармоники с помощью коэффициента пульсаций гармоник. Высшие гармоники увеличивают потери в энергетических сетях, снижая коэффициент полезного действия оборудования, вызывая паразитные тормозные моменты в двигателях, потери в магнитопроводах трансформаторов, дополнительный нагрев и выход из строя конденсаторов, предохранителей, электродвигателей, люминесцентных ламп, ложные срабатывания автоматических выключателей и предохранителей. Наличие третьей гармоники и ее производных 9, 12 в нейтрали может потребовать увеличения сечения ее проводника. Гармонический шум (частые переходы через ноль), может служить причиной неправильной работой компонентов систем контроля. Так же наличие высших гармоник в сети ведет к повреждению чувствительного электронного оборудования.

Для правильной оценки влияния высших гармоник тока, генерируемых статическими силовыми преобразователями, необходимо иметь точную информацию о форме кривой напряжения переменного тока на выводах преобразователя, его схеме, типе системы управления, полном сопротивлении сети переменного тока и параметрах цепи постоянного тока. Преобразователи большой мощности (несколько мегаватт) обычно имеют со стороны постоянного тока индуктивность много большую, чем со стороны переменного тока. При этом преобразователь ведет себя как источник гармоник напряжения на стороне постоянного и как источник гармоник тока – на стороне переменного тока. Кроме того, в симметричной системе переменного тока результирующие токи равны во всех фазах.

Гармонические составляющие кривой тока. Идеальный p – фазный однополупериодный преобразователь, изображен на рисунке 1, имеет нулевое сопротивление сети переменного тока и бесконечную сглаживающую индуктивность.

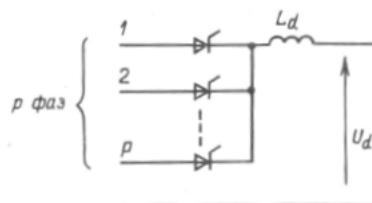


Рис. 1. Однополупериодный p – фазный преобразователь

В этом случае фазовые токи представляют собой периодические положительные прямоугольные импульсы длиной $\omega=2\pi/\rho$, повторяющиеся с питающей частотой. Если при анализе кривой (рисунок 2) за точку отсчета принять середину импульса, то можно заметить, что функция $F(\omega t)$ является частотной [т.е. $f(x)=f(-x)$] и ряд Фурье имеет, лишь косинусные составляющие.

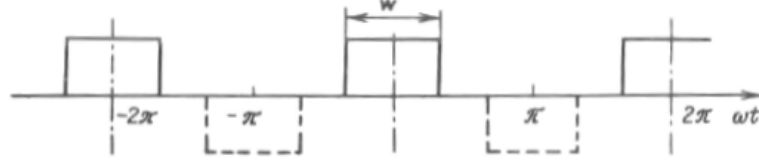


Рис. 2. Последовательность положительных и отрицательных импульсов

А соответствующие коэффициенты Фурье следующие:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\omega}{2}}^{\frac{\omega}{2}} d(\omega t) = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\rho}; \quad (1)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\omega/2}^{\omega/2} \cos(n\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{\pi n} \sin \frac{n\omega}{2} = \frac{2}{\pi n} \sin \frac{\pi n}{2}; \quad (2)$$

При этом ряд Фурье для положительных импульсов тока имеет вид:

$$F_p = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\omega}{4} \sin \frac{\omega}{2} \cos \omega t + \frac{1}{2} \sin \frac{2\omega}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3\omega}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{4} \sin \frac{4\omega}{2} \cos 4\omega t + \dots \right\} \quad (3)$$

Идеальный ρ – фазный двухполупериодный преобразователь, генерирующий и положительные, и отрицательные импульсы тока, изображен на рисунке 3. Запись выражений (1) и (2) для отрицательной группы импульсов дает разложение в следующий ряд Фурье:

$$F_n = \frac{2}{\pi} \left\{ -\frac{\omega}{4} \sin \frac{\omega}{2} \cos \omega t - \frac{1}{2} \sin \frac{2\omega}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3\omega}{2} \cos 3\omega t - \frac{1}{4} \sin \frac{4\omega}{2} \cos 4\omega t + \dots \right\};$$

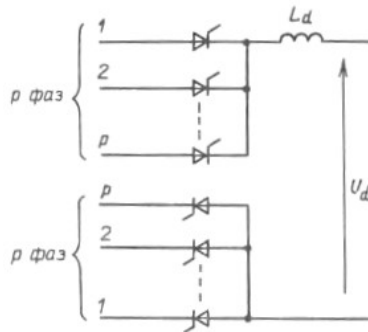


Рис. 3. Двухполупериодный ρ – фазный преобразователь

Фазовый ток двухполупериодного преобразователя состоит из положительных и отрицательных импульсов вида $F(\omega t + \pi) = -F(\omega t)$, а его разложение в ряд Фурье достигается суммированием выражений (3) и (4):

$$F = F_p + F_n = \frac{4}{\pi} \left\{ \sin \frac{\omega}{2} \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3\omega}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin \frac{5\omega}{2} \cos 5\omega t + \dots \right\}; \quad (5)$$

При этом исчезают составляющие постоянного тока и гармоники четных порядков.

Запись выражения (5) для прямоугольной волны, изображенной на рисунке 4.а, где $\omega = \pi$, дает следующее представление кривой в области частот:

$$F(t) = \frac{4}{\pi} \left\{ \cos(\omega t) - \frac{1}{3} \cos(3\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) + \dots \right\};$$

в котором гармоники с номерами $n = 1, 5, 9$ и т.д. присутствуют с положительным знаками, а гармоники с номерами $n = 3, 7, 11$ и т.д. с отрицательными.

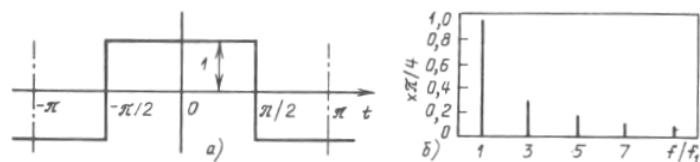


Рис. 4. Представление прямоугольной волны во временной (а) и в частотной (б) областях

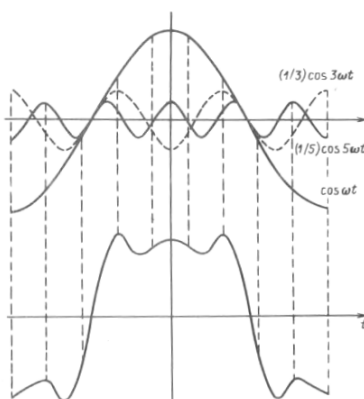


Рис. 5. Построение результирующей кривой прямоугольной волны из ограниченного числа членов ряда Фурье

Спектр амплитуд гармоник прямоугольной волны показан на рисунке 4.б. Кривые во временной области могут быть получены и сложением временных представлений каждой гармоники. На рисунке 5 показано получение результирующей волны для рассматриваемого случая. Для лучшего восприятия на рисунке изображены лишь основная, третья и пятая гармоники и соответствующая им результирующая кривая.

После оценки влияния высших гармоник тока, в большинстве случаев оказывается невозможным эффективное использование батарей статических конденсаторов, возникает необходимость применения фильтров высших гармоник.

Силовые фильтры высших гармоник представляют собой LC либо RLC цепи, настроенные на подавляемую гармонику и работающие как поглотитель, превращая ее в тепло, которое выделяется на индуктивности или емкости. RLC цепь служит как широкополосный фильтр и резистор, регулирует ширину диапазона подавления высших гармоник.

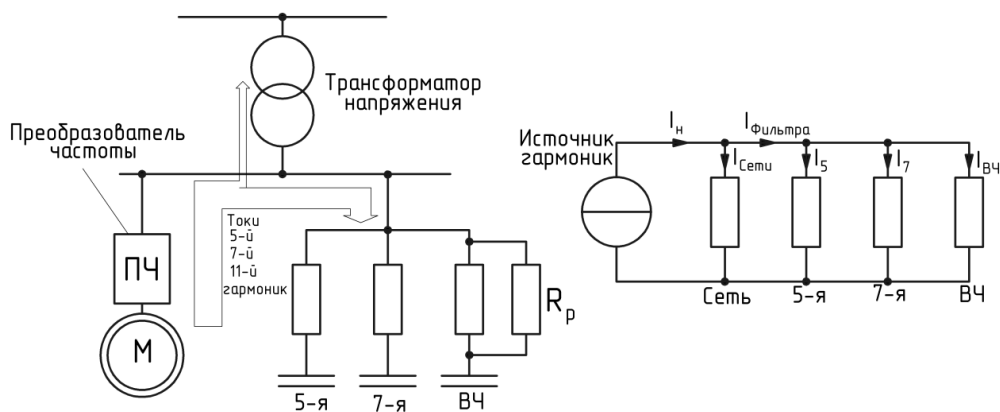


Рис. 6. Эквивалентная схема фильтр-компенсирующего устройства

Силовые фильтры высших гармоник, или фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) предназначены для снижения искажения кривой питающего напряжения и тока частотой 50 Гц, с одновременным повышением коэффициента мощности комплектных электроприводов, для нормализации показателей электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей с питающей сетью, а также для компенсации реактивной мощности в сети преобразователя.

ФКУ обеспечивают компенсацию реактивной мощности, потребляемую преобразователями, а также осуществляют фильтрацию вносимых ими в питающую сеть высших гармоник тока, создавая тем самым условия для улучшения качества электроэнергии в питающей сети.

Фильтро-компенсирующее устройство обычно представляет собой симметричную трёхфазную RLC-цепь. Фаза ФКУ состоит из набора параллельных звеньев - фильтров, каждый из которых рассчитан на компенсацию части дефицита реактивной мощности преобразователя и локализацию части спектра гармоник тока, генерируемых преобразователями.

Так же для устранения высших гармоник в питающей сети применяются специальные разделительные трансформаторы.

Разделительный трансформатор с обмотками "треугольник-звезда" позволяет эффективно бороться с гармониками, кратными третьей, при сбалансированной нагрузке. Для ослабления влияния несимметрии нагрузки и уменьшения тока нейтрали применяют "перекрестную" (зигзагообразную) систему обмоток, где вторичная обмотка каждой фазы разбита на две части и размещена на разных стержнях магнитопровода трансформатора.

Сбалансированные гармоники, кратные третьей, наводят соответствующие магнитные потоки в стержнях сердечника трансформатора и, если они равны по величине и совпадают по фазе, то напряжения, наведенные в первичной обмотке, будут скомпенсированы.

Кроме этого любой трансформатор имеет индуктивность рассеяния, которая добавляется к существующему полному входному сопротивлению распределительной сети. Это может оказывать эффект уменьшения коэффициента амплитуды тока нагрузки и суммарного значения коэффициента искажений синусоидальности тока.